

## التحكم بسرعة وموضع محرك بيزوكهربائي خطي باستخدام المتحكمات الذكية Fuzzy PID

\*د. أحمد كردي

(الإيداع: 18 كانون الثاني 2018، القبول 14 آذار 2018)

### الملخص

يعد المحرك البيزوكهربائي الخطي (Linear Piezoelectric Motor: LPZM) من أهم أنواع المحركات التي تقدم دقة عالية بالموضع واستجابة سريعة. يستخدم بشكل واسع في التطبيقات الصناعية والتطبيقات الطبية ولاسيما في الأدوات الجراحية والروبوتات.

في هذا المقال نقدّم دراسة تحليلية ونمذجة لمحرك بيزوكهربائي خطي مع نظام قيادة أمثلي له مستخدمين تقنية الذكي ذو المنطق الغامض من نوع Fuzzy PID، في البداية تم اعداد نموذج ديناميكي للمحرك البيزوكهربائي الخطي اعتماداً على معادلات الحركة للجزء المتحرك (المزلاق) بالنسبة للجزء الثابت. ثم تم تصميم نظام القيادة للمحرك اعتماداً على المتحكمات التقليدية PID وتم تعيير بارامترات المتحكم للحصول على أفضل استجابة ممكنة لا شارتي السرعة والموضع، الا أن الهدف من استخدام المحرك في تطبيقات الدقة العالية وسرعة الاستجابة تتطلب متحكماً أكثر دقة وأسرع استجابة من المتحكمات التقليدية فتم اختيار متحكم ذكي يعتمد المنطق الغامض وذلك لان العلاقة بين القوة الناتجة عن المحرك مع الجهد والتيار هي علاقة غير خطية.

أثناء عملية تصميم المتحكم Fuzzy PID تم تحديد درجة انتماء الدخل لمجموعات الدخل الغامضة، وتحدد ربح الخرج وفق قانون التحكم المطبق على النظام. كما تم بناء المتحكم في بيئة Matlab/Simulink، يعمل هذا النموذج المطور على التحكم بالسرعة والموضع معاً للمحرك LPZT.

لقد أظهرت النتائج المتحكم أن الذكي أسرع استجابة من المتحكم الكلاسيكي بمقدار 1.2 ميلي ثانية، مما يؤكد أهمية المتحكم الذكي ذو المنطق الغامض وسرعة أدائه للوصول لحالة الاستقرار خلال زمن أقل بالمقارنة مع المتحكمات الكلاسيكية.

الكلمات المفتاحية: المحرك البيزوكهربائي الخطي، المتحكم الغامض، النموذج الديناميكي.

\* عضو هيئة فنية في قسم تقنيات الحاسوب، الكلية التطبيقية، جامعة حماة.

## Speed and Position Control of a Linear Piezoelectric Electric Motor Using Intelligence Controllers Fuzzy PID

\* Dr. Ahmad Kurdi

(Recived:18 January 2018, Accepted:14 March2018)

### Abstract:

Linear piezoelectric motor (LPZM) is a kind of motor which offers high precision and fast response. It is widely used in industrial and medical applications, surgical instruments and robots, etc.

In this article, we present an analytical study and modeling of a linear piezoelectric motor with system drive using Fuzzy PID controller.

Firstly, a dynamic model of the linear piezoelectric motor was developed based on the motion equations of the sliding part of the motor.

Secondly, the drive system was designed based on the traditional PID controller.

It's parameters were calibrated to obtain the best possible response for speed and position signals, However, the purpose of using the motor in high precision applications requires a more precise control and faster response than traditional controllers. An intelligent controller based on Fuzzy PID was selected because the nonlinearity relationship between the current and position displacement.

During the design process of the Fuzzy PID controller, we determined the degree of input belonging to the fuzzy input groups and determining the output gain according to the control law applied to the system. On the other hand, the controller has been built sur Matlab/Simulink environment. This developed driving system controls both speed and position for the motor.

The results have been shown that the Fuzzy PID controller is faster response from the classical controller by 1.2 milliseconds, which confirm the importance of Fuzzy PID in terms of speed and performance to stability.

Keywords: Piezoelectric Electric Motor, Fuzzy PID Controller, Dynamic Modeling.

---

\*Dept. of Computer Technicals, Applied Faculty, University of Hama.

**1- مقدمة:**

لقد أصبح للمحركات البيزوكهربائية دوراً مهماً في الصناعات الحديثة لما تمتلكه من حجوم وأوزان صغيرة وسرعات منخفضة. إن أوسع مجال لاستخدام المحركات البيزوكهربائية هو مجال الكاميرات الرقمية والسيارات الحديثة ومؤخراً توجهت إلى المجال الطبي (التصوير بالرنين المغناطيسي) وكذلك في مجال طب العيون، **ان أهم ما يميز عملها أنها تعتمد على الحقل الكهروساكن في مبدأ عملها ولا تعتمد على الحقل المغناطيسي كباقي المحركات الكهربائية.** ان هذا النوع من المحركات الخاصة تحتاج الى نظام تحكم خاص ودقيق نستطيع، تقسيم منظومة التحكم بالمحرك إلى قسمين:

- نظام التحكم بالحلقة المفتوحة يكون خرجه غير متعلق بدخله (أي لا تتم عملية المقارنة بين إشارة الدخل وإشارة الخرج وإجراء التصحيح للخرج).
  - نظام التحكم بالحلقة المغلقة فهو ذلك النظام الذي يؤخذ خرجه كإشارة تغذية عكسية ثم تقارن مع إشارة الدخل وهنا سوف نحصل على إشارة الخطأ، ويتم معالجتها وإجراء التصحيحات على الخرج وصولاً إلى استجابة أمثلية في الخرج.
- تم التركيز في هذا البحث على نظام القيادة مستخدمين تقنيات الذكاء الصناعي متمثلة بتقنية المنطق الغامض fuzzylogic للحصول على نظام تحكم وقيادة ذو أداء متميز قادر على التلائم مع الخصائص اللاخطية لسلوك المحرك.

**2- الدراسة المرجعية:**

إن أول نموذج عملي للمحرك البيزوكهربائي تم تصميمه من قبل الباحث H.V. Barth في عام 1973 في شركة IBM، يتألف هذا المحرك من هزازين والذين يدفعان أسطوانة، عندما يتم تهييج أحد الهزازين من قبل العنصر البيزوكهربائي، فإن المحرك يدور بأحد الاتجاهين، من أجل الدوران في الاتجاه المعاكس يتم تهييج الهزاز الآخر مع العنصر البيزوكهربائي المقابل له، بعد ذلك بعدة سنوات قام الباحثان ال روسيان V.V. Lavrinenko و P.E. Vasiliev ببناء عدة تصاميم تعتمد على مبدأ عمل المحرك فوق الصوتي المصمم من قبل Barth. في ذلك الوقت، كان استخدام هذه المحركات في التطبيقات العملية قليلاً بسبب التآكل المفرط بين القسم الثابت والقسم المتحرك على المحرك، الموثوقية الضعيفة للعنصر البيزوكهربائي، ومطال الاهتزاز المتغير كلها أمور حدثت من تطوير استخداماته.

إن أول تقدم حقيقي في تطوير المحرك فوق الصوتي أتى في ثمانينات القرن الماضي، وذلك نتيجة للتطور في صناعة العناصر نصف الناقلية في عام 1980، قام الباحث T. Sashida بتطوير محرك بيزوكهربائي دوار بملك مردوداً مساوياً لـ 40% عند سرعة 1500rpm وعزم حمولة 0.8kgf.cm. ثم قام Hitachi Maxel بتحسين وتبسيط محرك Sashida بشكل ملحوظ عن طريق استبدال عدة قطع بيزوكهربائية اهتزازية بوصلة ارتباط التوائية، أدى ذلك إلى تحسين المردود حتى 80% عند عزم حمولة 13kgf.cm، وكانت أبعاد المحرك 13mm x 60mm.

وفي عام 2014 قام الباحث Jacky بوضع نموذج للمحرك البيزو كهربائي الدوار معتمداً على المعادلة الديناميكية التي تصف معادلة الحركة بين الجزء الثابت والمزلاق وحصل على إشارة السرعة والموضع لكنه لم يستخدم المتحكمات الذكية في نظام القيادة.

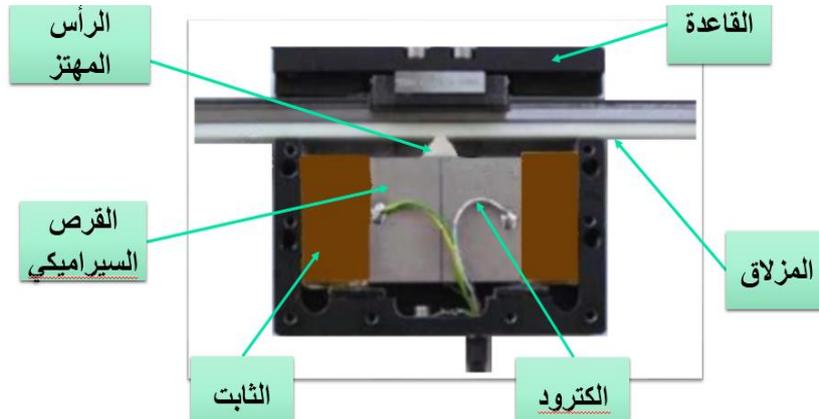
**3- أهمية البحث:**

تبرز أهمية هذا البحث في الاستفادة من خصائص المحرك المميزة والمتعلقة ببنية التي تسمح بإمكانية التحكم بموضع الجزء المتحرك وإمكانية الحصول على سرعة عالية في الاستجابة وذلك عندما يتوفر نظام القيادة المناسب، لذلك قمنا في هذا البحث باستخدام طريقتين للتحكم بالسرعة والموضع، الطريقة الأولى استخدمنا فيها منظمات PID التقليدية والثانية استخدمنا

المتحكم الذكي ذو المنطق العائم Fuzzy PID وتم مقارنة نتائج المحاكاة عن كلا الطريقتين بهدف تقييم أداء المحرك عند استخدامه في تطبيقات الدقة العالية مثل التحكم في موضع العدسات الليزرية المستخدمة في طب العيون ومعالجتها، هذه الدراسة تمت في البيئة البرمجية Matlab/Simulink.

#### 4- بنية ومبدأ عمل المحرك البيزوكهربي الخطي المدروس:

يتألف المحرك من الجزء الثابت (Actuator) والجزء الدافع (Pusher) أو ما يسمى بالرأس المهتز، المزلاق (Slider) حيث يتألف الجزء الثابت من شريحة مصنوعة من السيراميك البيزوكهربي وهي مستطيلة الشكل يتوضع على سطحها الكترودين مشتركين إحدهما على السطح والثاني على السطح المقابل له، وفوق الشريحة البيزوكهربية يتوضع الجزء الدافع أو ما يسمى بالرأس المهتز الذي يحافظ على الاحتكاك مع المزلاق متصل على طول حافة الثابت ويعتبر الجزء المتحرك في المحرك.

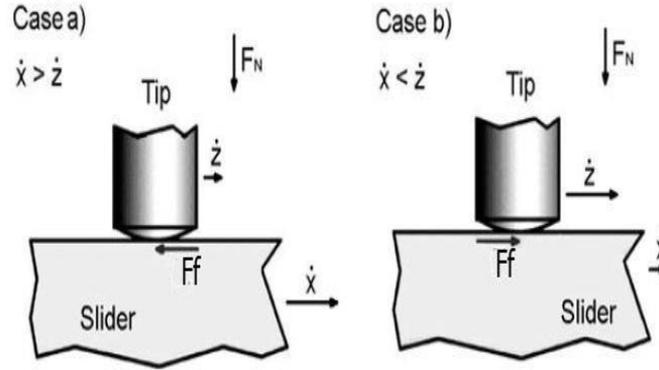


الشكل رقم (1): أجزاء المحرك البيزوكهربي الخطي ذي الموجة الساكنة

إن المحرك الموضح بالشكل (1) هو من إنتاج الشركة اليابانية SHINSE. حيث تم تصنيع الجزء الثابت من مادة برونز البيرليوم (عنصر فلزي نادر) ويتم تهيجه وفقاً لأحد أنماط الاستجابة الميكانيكية (نمط طولاني، نمط عرضاني، نمط القص)، أما المزلاق فتم تصنيعه من مادة الديورالومين ويوجد أسفل المزلاق مادة لدنة احتكاكية تحسن من التماس مع الثابت وتخفف معامل الاحتكاك وتضمن عدم التآكل والاهتراء، وهذا المزلاق يضغط على الثابت من خلال نابض يسمح بتعبير الإجهاد المحوري المطبق وهذا ما أشار اليه الباحثين Karl وBurhanetti (2016).

#### 5- النموذج الديناميكي للمحرك البيزوكهربي الخطي LPZM:

تم استخدام طريقة النموذج الديناميكي لأنها تعطينا إستجابة السرعة والتسارع والموضع للمحرك وبالتالي تعطينا دراسة السلوك الحركي للمحرك، من أجل ذلك ننطلق من معادلات الحركة والتي يمكن أن تتحدد بإستخدام آلية القيادة الموصوفة بالشكل (2)، للتأكد من المفهوم المذكور سابقاً ولتحليل حركة الانزلاق للجزء المتحرك، وتحديد القوة الطبيعية يمكن للنموذج أن يستخدم ليأخذ معادلات الحركة للمزلاق (كتلته  $m$  ومحوره  $x$ ) ويتسارع بواسطة قوة الاحتكاك  $F_f$ .



الشكل رقم (2): مبدأ الحركة في المحرك البيزوكهربائي الخطي

يعتمد اتجاه قوة الاحتكاك على السرعة النسبية للمزلاق وعلى الرأس المهتز، الفرضيتان الرئيسيتان لإنشاء نموذج لحركة المزلاق هو أن القوة الطبيعية بالنسبة للدافع دائماً ضاغطة وأن عملية الاحتكاك هي القوة المؤثرة على الانزلاق فقط بين الرأس المهتز والمزلاق، إذا كانت القوة الطبيعية غير ضاغطة ذلك يعني أن الاتصال بين المزلاق والرأس المهتز مفقود. علاوة على ذلك فإن تأثير الرأس المهتز على سطح المزلاق يسبب ضعف واهتراء للرأس المهتز كما يتطلب جهد إضافي والذي بدوره يؤثر على الإستجابة الكلية للنظام.

$\dot{z}$  : سرعة الرأس المهتز تقاس بـ mm/s.

$F_f$  : قوة الاحتكاك على المزلاق تقاس بـ نيوتن.

$F_N$  : القوة الطبيعية تقاس بـ نيوتن.

$\dot{x}$  : سرعة المزلاق تقاس بـ mm/s.

إن معادلة الحركة للمحرك البيزوكهربائي تعطى بالعلاقة التالية [A]:

في حالة:  $\dot{x} > \dot{z}$  أي سرعة المزلاق أكبر من سرعة الرأس المهتز للمحرك فإن:

$$m\ddot{x}(t) = -F_f(t) = -\mu F_N(t) \quad (1)$$

أي سرعة المزلاق أصغر من سرعة الرأس المهتز للمحرك فإن:  $\dot{x} < \dot{z}$  في حالة:

$$m\ddot{x}(t) = F_f(t) = \mu F_N(t) \quad (2)$$

بأخذ كلتا الحالتين فتصبح المعادلة من الشكل التالي:

$$m\ddot{x}(t) = \text{sign}[\dot{x}(t) - \dot{z}(t)] \cdot F_N(t) \quad (3)$$

حيث أن معادلة القوة الطبيعية:

$$F_N(t) = F_0 + F \cdot \cos(\omega t) \quad (4)$$

ومعادلة الحركة للرأس المهتز على المحور الشاقولي:

$$z(t) = z_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi_0) \quad (5)$$

حيث أن:

$x(t)$  : يمثل محور المزلاق (الجزء المتحرك).

$z(t)$  : يمثل محور الرأس المهتز **tip** (الجزء الثابت).

$F_0$  : قوة ما قبل التحميل.

$F$  : مطال القوة الطبيعية الجيبية.

$z_0$  : المطال لحركة الرأس المهتز.

$\varphi_0$  : الإزاحة بين الرأس المهتز والقوة.

$m$  : كتلة المزلاق.

$\mu$  : معامل الاحتكاك بين الرأس المهتز وسطح المزلاق.

$w$  : التردد الزاوي.

نَعَوِّضُ المعادلات (3)، (4)، (5) في المعادلة (2) فينتج لدينا المعادلة النهائية التالية:

$$\ddot{x}(t) = \frac{\mu}{m} \text{sign}[\dot{x}(t) - z_0 \cdot w \cdot \cos(wt - \varphi_0)](F_0 + F \cdot \cos(wt)) \quad (6)$$

هذه المعادلة تعبر عن تصميم نموذج حركة المحرك البيزوكهربائي الخطي مع أخذ القيم المناسبة لنموذج المحرك بالاعتماد على الدراسة التصميمية من برنامج التمثيل الرقمي ANSYS وهو عبارة عن برنامج متعدد مهام الدراسة يعتمد على مبدأ العناصر المنتهية في إيجاد الحل الأمثل، وتم من خلاله الحصول على بعض البارامترات المطلوبة لنمذجة المحرك [B].

الجدول رقم (1): بارامترات المحرك المستخدمة في النمذجة

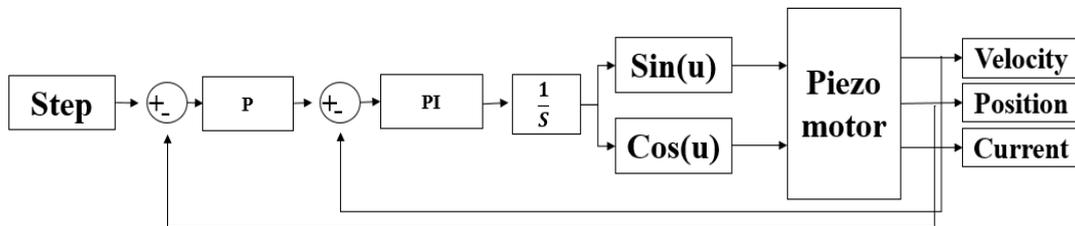
$\mu$	0.17	معامل الاحتكاك
$m$	2.28kg	كتلة المحرك
$w$	$2\pi 40\text{kHz}$	السرعة الزاوية
$\varphi_0$	$90^\circ$	الازاحة بين الطورين
$F$	20N	القوة الطبيعية
$F_{\text{preload}}$	20N	القوة المسبقة
$Z_0$	$1.5\mu\text{m}$	مطال السرعة

6- تنظيم السرعة والموضع معاً للمحرك البيزوكهربائي الخطي:

إن الهدف من تنظيم السرعة مع تنظيم الموضع هو الحصول على دقة في الموضع مع استجابة ممتازة للسرعة وذلك من أجل تطبيقات معينة مثل التطبيقات الخاصة بالأنظمة الطبية وأنظمة الطيران ومشغلات العدسات.

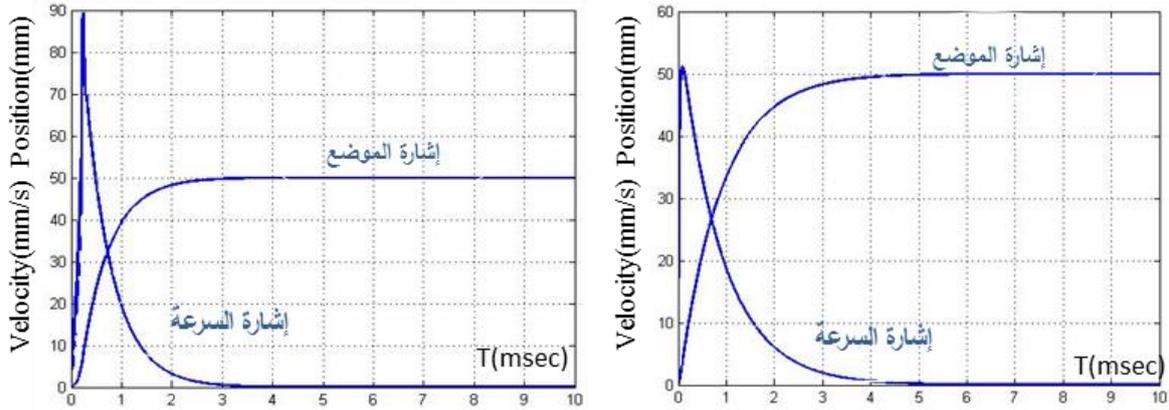
1-6 تنظيم السرعة والموضع باستخدام منظمات PI:

إن متحكم السرعة هو عبارة عن منظم تناسبي-تكاملي PI له ثابتين  $K_p, K_i$  ، أما متحكم الموضع عبارة عن منظم P له ثابت واحد فقط هو  $K_p$ .



الشكل رقم (3): تنظيم السرعة مع الموضع باستخدام منظم PI

تم إجراء محاكاة للنموذج الميّن في الشكل (3)، من خلال عملية المحاكاة تم طلب الوصول للموضع 50mm فترتعت سرعة المحرك إلى 53mm/mSec وبعد ذلك تناقصت بالتدرّج حتى تصل للموضع المطلوب عند اللحظة 4mSec. الآن نقوم بتغيير قيم بعض الثوابت للمتحكمات كما هو موضح في الشكلين (4-a) ، (4-b):



(b)

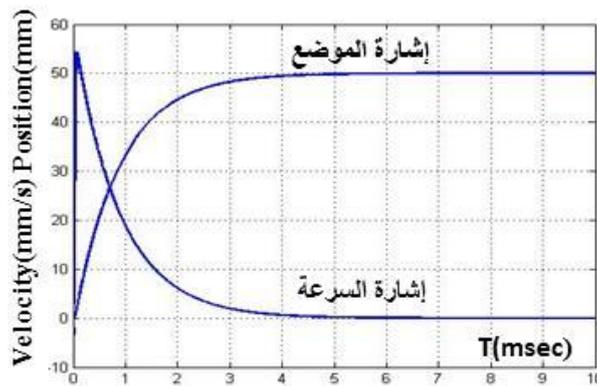
(a)

الشكل رقم (4): اشارتي السرعة والموضع عند تغيير قيم ثوابت المتحكمات

في الشكل (4-ا) نلاحظ عند اعطاء القيمة  $K_p=1.25$ ,  $K_I=5$  فإن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل  $90\text{mm/sec}$  حتى تتناقص وتصل للموضع المطلوب خلال زمن سريع قدره  $3\text{mSec}$  ولكن هذا على حساب السرعة الأساسية للمحرك التي قيمتها  $53\text{mm/Sec}$  لذلك فإن عمل المحرك يكون في المجال غير المسموح.

من الشكل (4-ب) نلاحظ أنه عند اعطاء الثابت القيمة  $K_p=2$ ,  $K_I=5$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل  $50\text{mm}$  حتى تتناقص وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره  $5\text{mSec}$  وبالتالي تتناقص زمن الاستجابة عن الحالة الأساسية وهذا غير مرغوب.

وأخيراً توصلنا إلى قيم لثوابت المنظم والتي تعطي أفضل استجابة في السرعة والموضع وهي موضحة بالشكل (5): نلاحظ عند طلب موضع  $50\text{mm}$  ترتفع سرعة المحرك إلى  $53\text{mm/s}$  وبعد ذلك تتناقص بالتدريج حتى تصل للموضع المطلوب عند اللحظة  $4.8\text{mSec}$  وهو زمن استجابة مرغوب به.

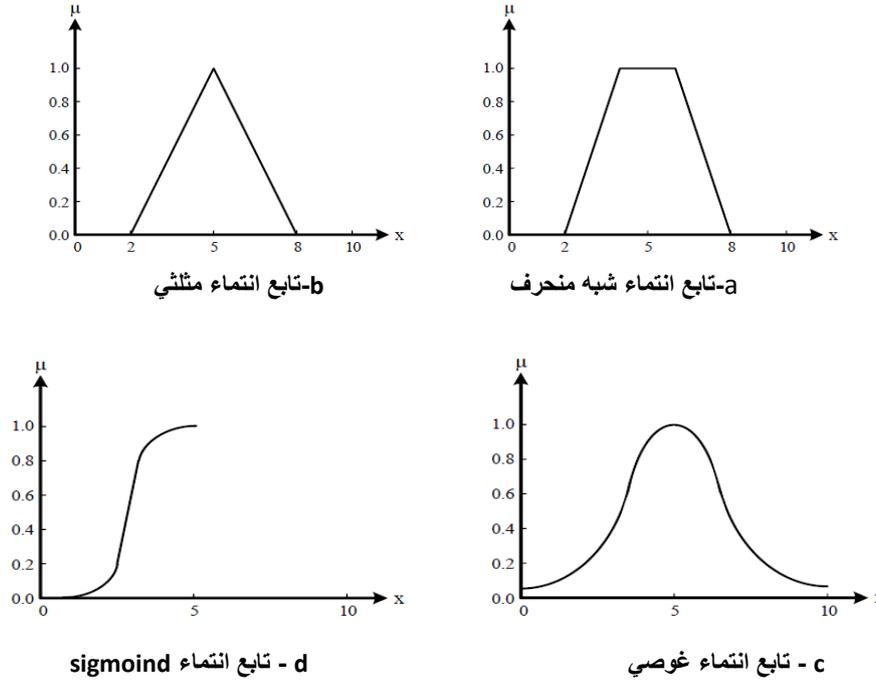


الشكل رقم (5): استجابة السرعة والموضع الأمثلية

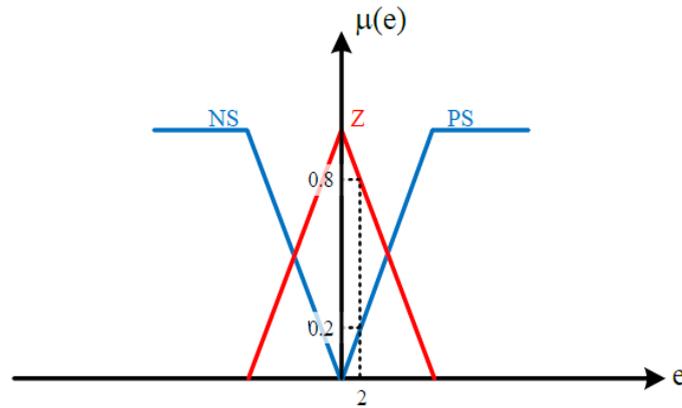
## 2-6- تنظيم السرعة والموضع باستخدام متحكم الذكي ذو المنطق الغامض FUZZY PID:

إن متحكم المنطق الغامض (Fuzzy Logic Controller) FLC يعد من أوسع تطبيقات نظام المنطق الغامض FLS (Fuzzy Logic System) انتشاراً. وهناك ثلاث أنماط متبعة لبناء الـ FLC وهي Mamdani type و Sugeno type و [D]Tsukamoto type.

قام البروفيسور Zaiden في عام 1965 بتوسيع مفهوم المجموعة الثنائية التي يتم تحديد انتماء أي عنصر لها ب(0) أي لا انتماء أو (1) أي انتماء مطلق، إلى مفهوم المجموعة الغامضة حيث يتم تحديد انتماء كل عنصر لها عن طريق درجة انتماء تتراوح بشكل مستمر بين (0) (أي درجة انتماء العنصر للمجموعة صفرية) وحتى (1) (أي أن العنصر منتمي بشكل كامل للمجموعة)، يمكن أن ينتمي عنصر بشكل كامل لمجموعتين أو أكثر بنفس الوقت، حيث تعتبر المجموعات الغامضة هي الحالة العامة من المجموعات الثنائية. أما توابع الانتماء فهي توابع تقوم بتوصيف درجة انتماء عنصر ما للمجموعات الغامضة، يوضح الشكل (5) بعض توابع الانتماء الشهيرة [E].

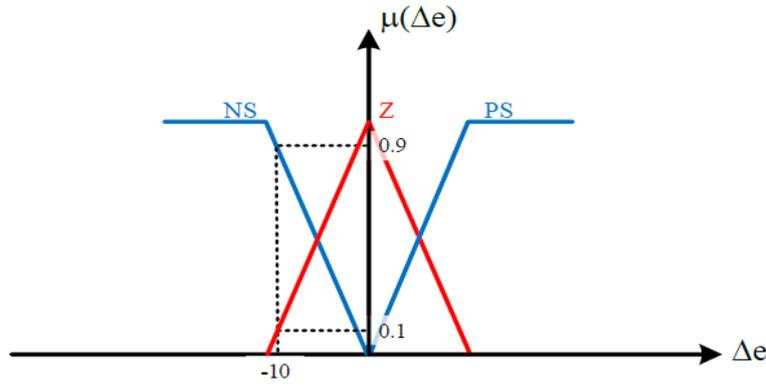


الشكل رقم (6): بعض توابع الانتماء الشهيرة



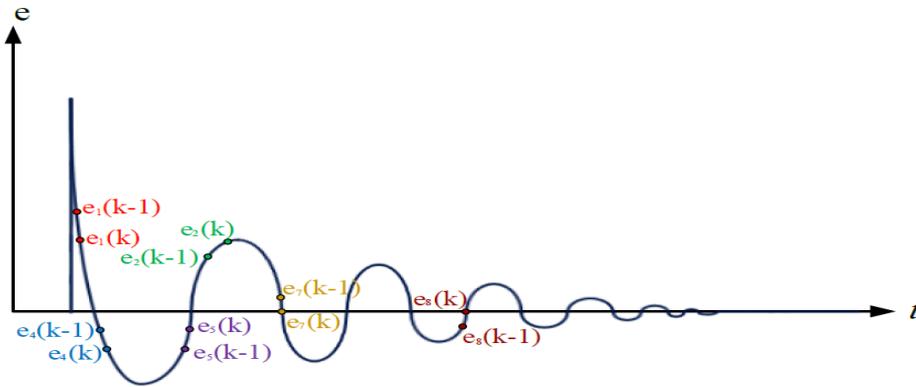
الشكل رقم (7): توابع الانتماء للخطأ

يوضح الشكل (7) عمل وحدة Fuzzifier، حيث أن الخطأ  $e=2$  ينتمي للمجموعة الغامضة Z بدرجة انتماء  $\mu_Z(2)=0.8$  بينما ينتمي للمجموعة  $\mu_{PS}(2)=0.2$ . أيضاً إن تغير الخطأ  $\Delta e=-10$  ينتمي للمجموعة الغامضة Z بدرجة انتماء  $\mu_Z(-10)=0.1$ ، وللمجموعة NS بدرجة انتماء  $\mu_{NS}(-10)=0.9$ ، بعد هذه المرحلة سيقوم الـ Inference Engine بإيجاد القاعدة المناسبة من Knowledge Base.



الشكل رقم (8): توابع الانتماء لتغير الخطأ

يمكن استنتاج جداول الخبرة بالاعتماد على قيم الخطأ ونعتبر إشارة الخطأ كما يلي:



الشكل رقم (9): شكل إشارة الخطأ

من الشكل (8) يمكن ملاحظة الحالات التالية والتي تضمنت في الجدول (2):

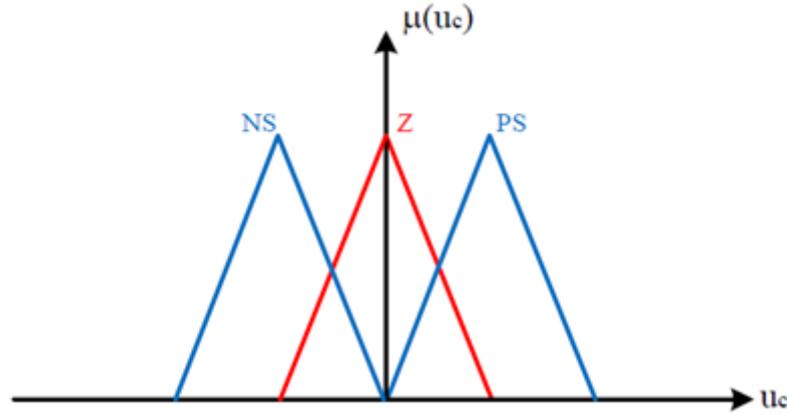
الجدول رقم (2): تحليل إشارة الخطأ وتغير الخطأ

قانون التحكم	حالة النظام	إشارة الخطأ
PS	النظام يتجه للقيمة المرجعية بخطأ متناقص.	$e_1 > 0$
PS	النظام يبتعد عن القيمة المرجعية بالاتجاه السالب وخطأ متزايد.	$e_2 < 0$
PS	خطأ ستاتيكي، النظام لم يتمكن من الوصول إلى القيمة المرجعية.	$e_3 = 0$
NS	النظام يبتعد عن القيمة المرجعية وخطأ متزايد (Over shoot).	$e_4 < 0$
NS	النظام يقترب من القيمة المرجعية وخطأ متناقص.	$e_5 > 0$
NS	حالة خطأ ستاتيكي، النظام تجاوز القيمة المرجعية.	$e_6 = 0$
PS	النظام وصل للقيمة المرجعية وخطأ متناقص.	$e_7 < 0$
NS	النظام وصل للقيمة المرجعية وخطأ متزايد.	$e_8 > 0$
Z	استقرار النظام عند القيمة المرجعية.	$e_9 = 0$

ونستطيع استنتاج جدول الخبرة كما هو مبين في الجدول (3):

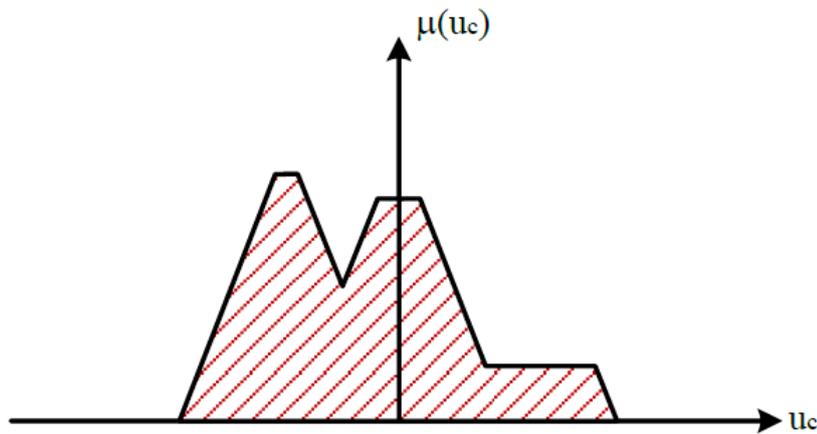
الجدول رقم (3): جدول الخبرة الممثل لثلاث مجموعات انتماء

$\mu_e$ \ e	e	NS	Z	PS
NS		NS	PS	PS
Z		NS	Z	PS
PS		NS	NS	PS



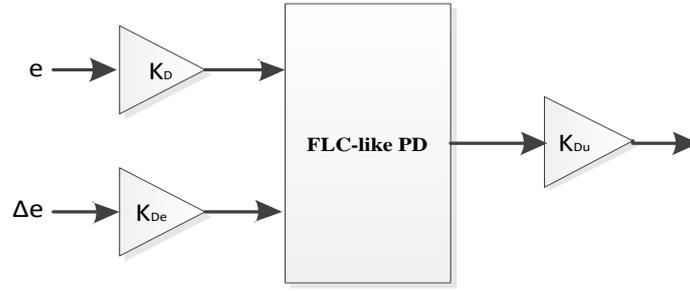
الشكل رقم (10): توابع الانتماء للخروج

يبين الشكل (10) توابع انتماء الخرج، يجب ملاحظة أن توابع انتماء الخرج هي توابع مغلقة وذلك ليتوافق مع حقيقة أن منبع الطاقة في النظام هو منبع ذو طاقة محدودة، لاستنتاج قانون التحكم النهائي يجب القيام بعملية Defuzzification، سيتم الاعتماد على طريقة COG، بالرجوع للقيم الموضحة بالشكلين يمكن الحصول على المخطط المبين بالشكل (11)[C].



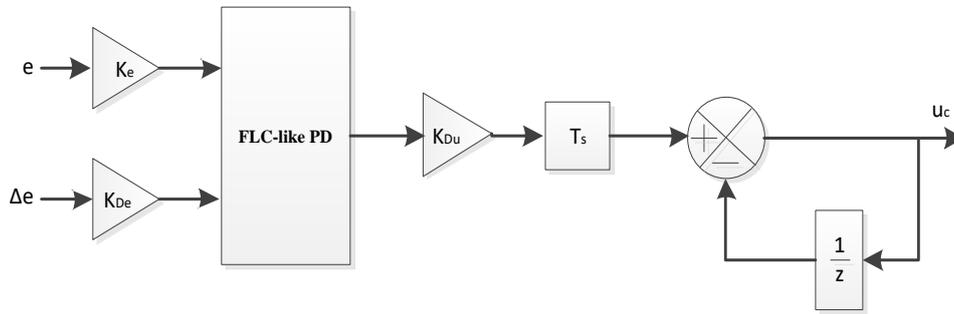
الشكل رقم (11): المساحة المعبرة عن قانون التحكم الواجب تطبيقه على النظام

يمكن تمثيل متحكم غامض من نمط PI كما هو موضح في الشكل (12).



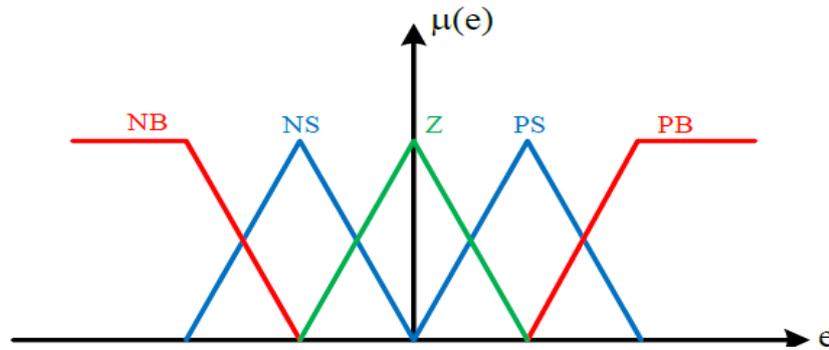
الشكل رقم (12): متحكم منطقي غامض من النمط PD

إن قيم الربح المبينة في الشكلين (12) يجب توليفها للحصول على استجابة أمثلية حيث تلعب أرباح الدخل دوراً مهماً في تحديد درجة انتماء الدخل لمجموعات الدخل الغامضة، ويحدد ربح الخرج قيمة قانون التحكم المطبق على النظام [F].



الشكل رقم (13): متحكم منطقي غامض من النمط PI

لزيادة دقة المتحكمات تم زيادة عدد مجموعات الدخل والخرج وتوسيع جدول الخبرة ليصبح كما في الجدول (2) .

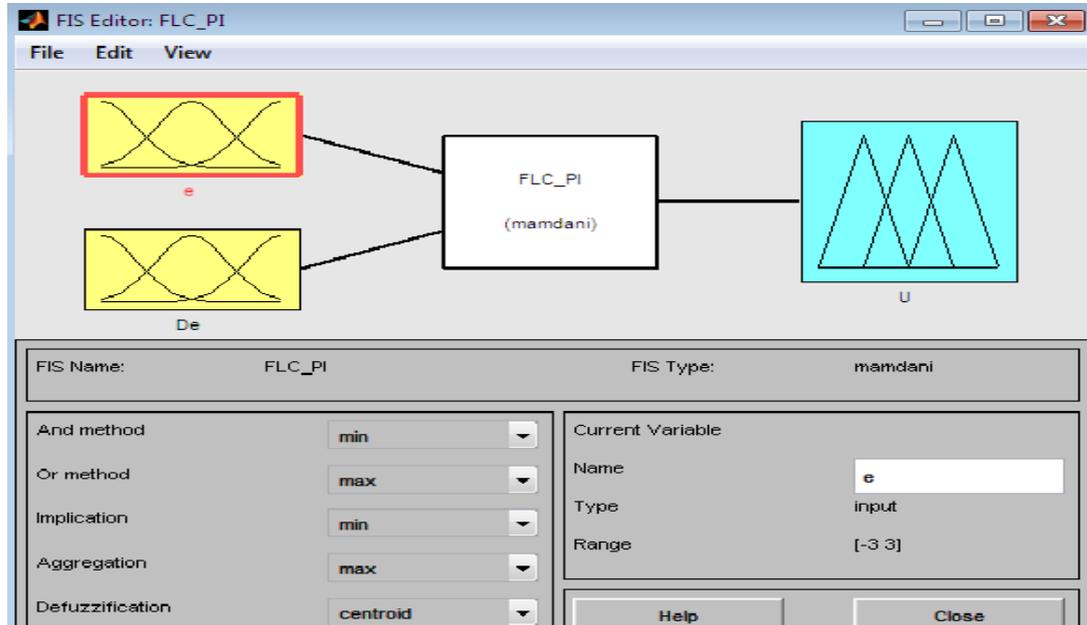


الشكل رقم (14): توابع الانتماء للخطأ بعد التوسعة

وتجدر الإشارة الى إن سيئة المتحكمات من نوع FLC هو زمن المعالجة الكبير نسبياً الذي يتطلبه المتحكم لتنفيذ العمليات، وهذا يحتاج معالج ذو خصائص متقدمة وبالتالي زيادة الكلفة للحصول على الأداء المميز الذي تتمتع به المتحكمات بدون المرور بمشكلة طول زمن المعالجة [G].

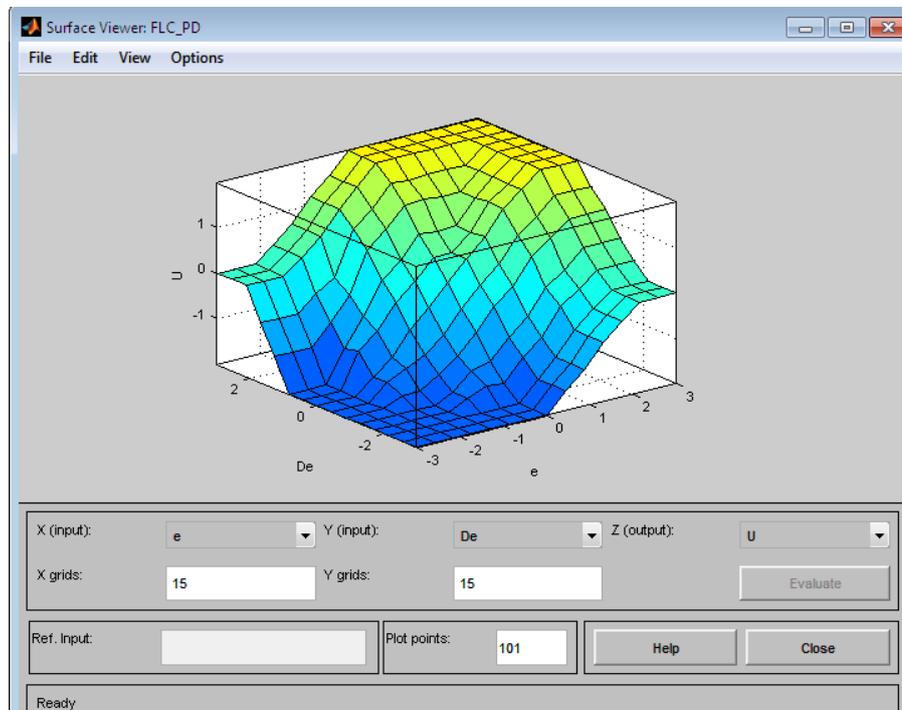
## 3-6 بناء المتحكمات في بيئة Matlab/simulink

من أجل بناء المتحكم ذو المنطق الغامض استخدمنا الأمر Fuzzy في بيئة Matlab/Simulink فحصلنا على الواجهة المبينة في الشكل (15):



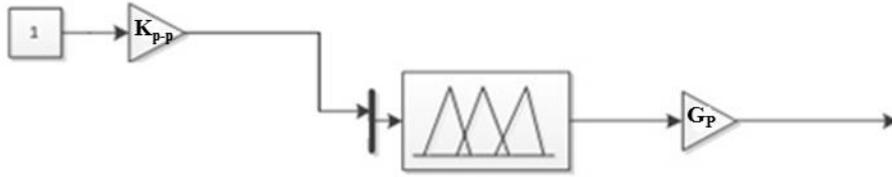
## الشكل رقم (15): واجهة المتحكم العائم في بيئة Matlab/simulink

أثناء عملية البناء تم الاعتماد على قواعد الانتماء والتي هي عبارة عن 49 تابع انتماء ثم نحصل على سطح المتحكم بعد إضافة توابع الانتماء من القائمة `View>>Surface`:

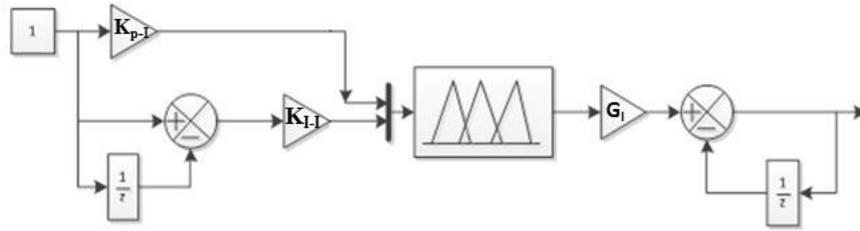


## الشكل رقم (16): سطح المتحكم

بالنظر الى نموذج المحرك مع المتحكمات التقليدية التناسبية-التكاملية-PI، نقوم باستبدالها بمتحكمات ذكية، Fuzzy PI، Fuzzy P كما هو موضح بالشكل:



الشكل رقم (17): المتحكم من نوع Fuzzy P



الشكل رقم (18): المتحكم من نوع Fuzzy PI

$K_{p-p}$ : عامل ربح الدخل للمنظم Fuzzy\_P.

$G_p$ : عامل ربح خرج المنظم Fuzzy\_P.

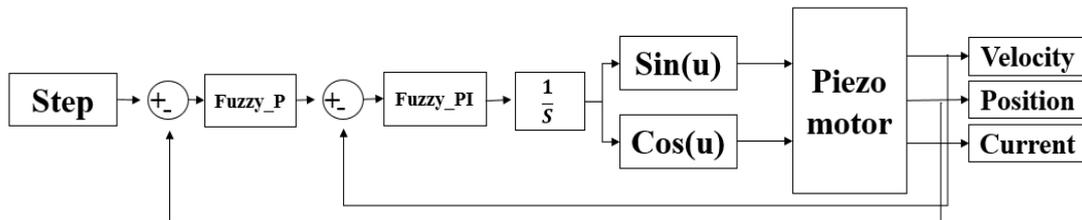
$K_{p-I}$ : عامل ربح الدخل للمنظم Fuzzy\_PI.

$K_{i-I}$ : عامل ربح الدخل للمنظم Fuzzy\_PI.

$G_i$ : عامل ربح خرج المنظم Fuzzy\_P.

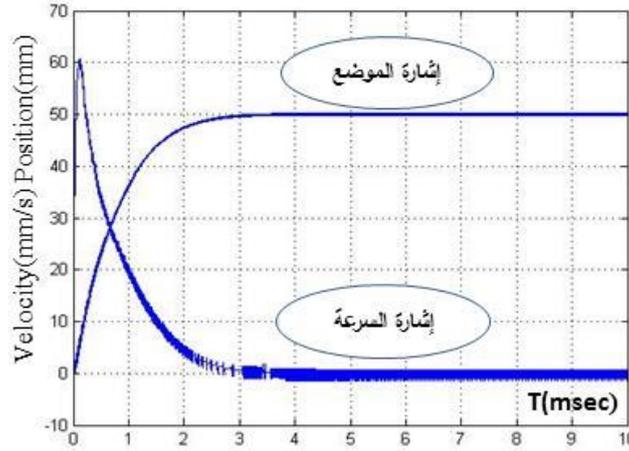
#### 4-6 التحكم بسرعة وموضع المحرك البيزوكهربائي الخطي:

اعتمادا على النموذج الرياضي للمحرك البيزوكهربائي الخطي LPZT وعلى قواعد صياغة المتحكمات الذكية FUZZY-PI تم نمذجة المحرك مع نظام قيادته في بيئة Matlab/Simulink. يعمل هذا النموذج المطور على التحكم بالسرعة والموضع معاً للمحرك LPZT.



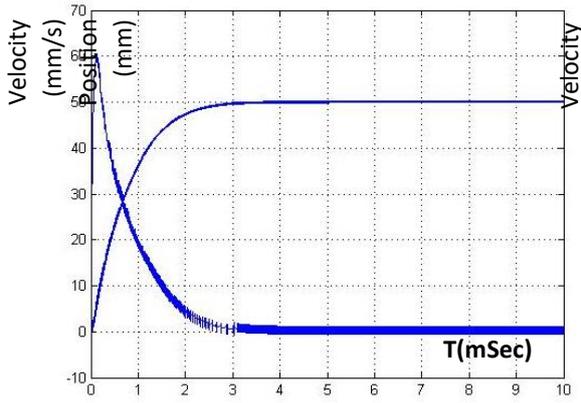
الشكل رقم (19): المخطط الصندوقي لنظام قيادة المحرك للحكم بالسرعة مع الموضع باستخدام Fuzzy PID

بعد الانتهاء من بناء النموذج الكامل للمحرك مع نظام القيادة المطور، قمنا بإجراء محاكاة للنموذج الموضح بالشكل (19) بعد أن قمنا بضبط عوامل الربح لمتحكمات المنطق العائم Fuzzy\_P, Fuzzy\_PI وفق قيم مناسبة وحصلنا على استجابة السرعة والموضع:

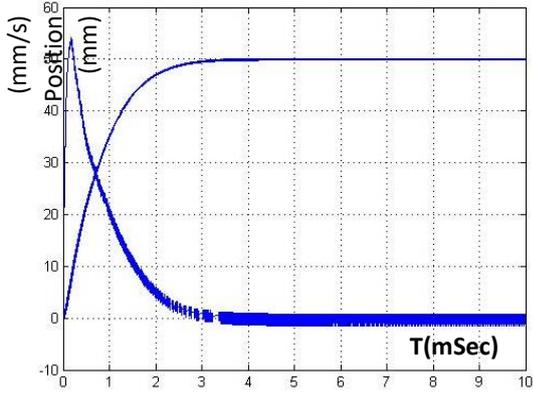


الشكل رقم (20): استجابة السرعة والموضع للنظام

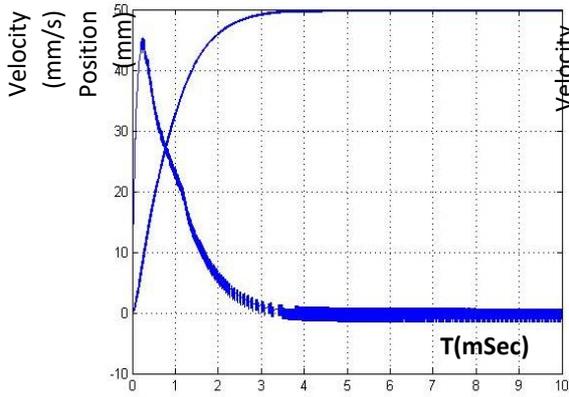
نلاحظ من الشكل (20) أنه عند طلب موضع 50mm ترتفع سرعة المحرك إلى 60mm/sec وبعد ذلك تتناقص حتى تصل للصفر بالتدرج وعندها يصل المحرك للموضع المطلوب عند اللحظة 3.6mSec وهو زمن استجابة جيد أسرع من حالة تنظيم السرعة مع الموضع في المنظم الكلاسيكي والتي كانت 4.8mSec وبالتالي يصل المحرك مع المنظم الذكي ذو المنطق الغامض بزمن أسرع من المنظم الكلاسيكي بمقدار 1.2 mSec. قمنا بتغيير قيم أرباح الدخل والخرج للمتحكمات حتى حصلنا على أفضل استجابة في اشارتي السرعة والموضع كما هو موضح في الأشكال (21:a-b-c-d-e-f-g):



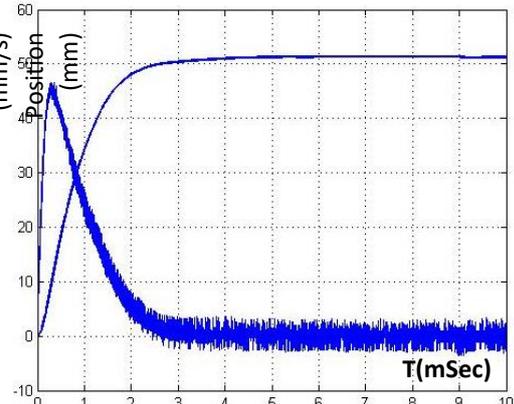
شكل (a)



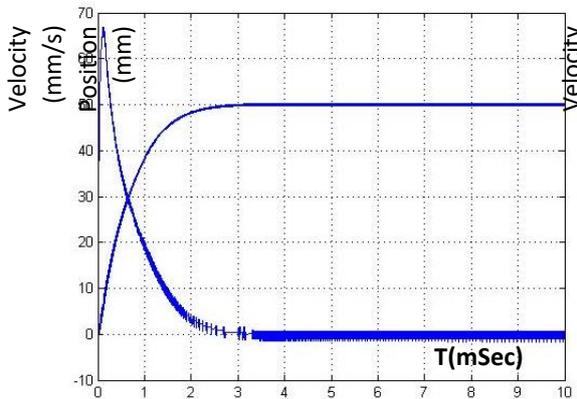
شكل (b)



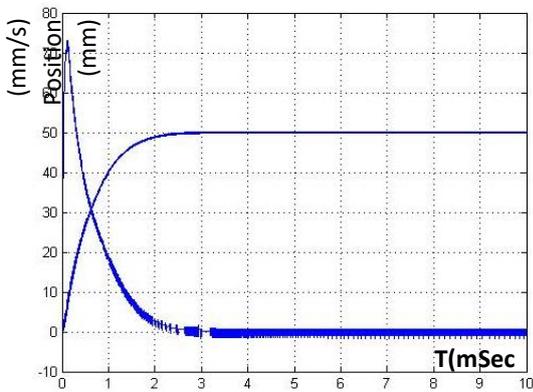
شكل (c)



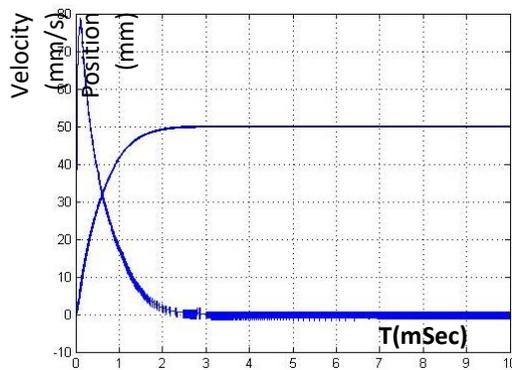
شكل (d)



شكل (e)



شكل (f)



شكل (G)

الشكل رقم (21): استجابة السرعة مع الموضع عند تغير عوامل ربح الدخل والخرج المتحكمات

النتيجة الموضحة على الشكل (21-a): تظهر أنه عند اعطاء القيمة  $G_I=1.5$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 60 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 3.8 ميلي ثانية.

في الشكل (21-b): نلاحظ عند تغيير قيمة  $K_{P-I}$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 53 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 3.5 ميلي ثانية وهذه الإشارة مرغوبة لأن المحرك يعمل ضمن قيمته الاسمية للسرعة وبالتالي ضمن مجال عمله الصحيح. أما في الشكل (21-c): نلاحظ عند تغيير قيمة  $K_{P-I}$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 43 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 3.8 ميلي ثانية. وفي الشكل (21-d) نلاحظ عند تغيير قيمة  $K_{I-I}$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 47 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 3 ميلي ثانية وهذا الزمن مرغوب لأن المحرك يعمل ضمن قيمته الاسمية للسرعة وبالتالي ضمن مجال عمله الصحيح لكن لدينا مشكلة في إهتزاز إشارة السرعة للمحرك وبالتالي حدوث ضجيج للمحرك.

من الشكل (21-e) نلاحظ عند تغيير قيمة  $G_P=250$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 68 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 3 ميلي ثانية وهذا الزمن مرغوب إلا أن المحرك تجاوز قيمته الاسمية للسرعة. في الشكل (21-f) نلاحظ عند تغيير قيمة  $G_P = 275$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 72 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 2.75 ميلي ثانية وهذا الزمن مرغوب إلا أن المحرك تجاوز قيمته الاسمية للسرعة.

من الشكل (21-g) نلاحظ عند تغيير قيمة  $G_P = 300$  أن إشارة السرعة ترتفع إلى قيمة تصل إلى 79 ميلي متر حتى تتناقص للصفر وتصل للموضع المطلوب خلال زمن قدره 2.5 ميلي ثانية وهذا الزمن مرغوب إلا أن المحرك تجاوز قيمته الاسمية للسرعة.

### الجدول رقم (3): استجابة السرعة والموضع للمحرك عند تغيير عوامل ربح الدخل والخرج للمتحكمات

#	اساسي	a	b	c	D	E	F	G
$K_{P-I}$	0.002	0.002	0.001	0.0005	0.002	0.002	0.002	0.002
$K_{I-I}$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1
$G_I$	1.1	1.5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
$K_{P-P}$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$G_P$	225	225	225	225	225	250	275	300
الزمن/ثانية	3.6	3.8	3.5	3.8	3.5	3	2.75	2.5

### 7 - نتائج وتوصيات:

في هذا البحث تم دراسة ونمذجة نظام تحكم لمحرك بيزوكهربائي خطي من أجل التحكم بسرعه وموضعه معاً. بداية تم استخدام متحكمات تقليدية من نوع PID وتم تقييم أدائها ضمن جملة نظام التحكم للسرعة والموضع حيث تم تعيير قيم ثوابت المتحكمات من أجل الحصول على الاستجابة المرغوبة للسرعة والموضع، ثم بعد ذلك تم استخدام متحكمات ذكية معتمدة على PID Fuzzy وتم نمذجة ومحاكاة النظام بوجود هذه المتحكمات وتم ضبط عوامل ربح الدخل والخرج للمتحكمات بما يناسب إشارة الخرج المطلوبة للسرعة والموضع. وأخيراً تم مقارنة نتائج محاكاة نظام القيادة من أجل المتحكمات التقليدية مع المتحكمات التقليدية مع المتحكم Fuzzy PID وأظهرت النتائج أن زمن استجابة المتحكم الذكي أقل مقارنة مع المتحكم

الكلاسيكي بمقدار 1.2 ميلي ثانية، بناءً عليه نستطيع اثبات أهمية وفعالية المتحكم الذكي ذو المنطق الغامض وسرعة الأداء والوصول لحالة الاستقرار خلال زمن أقل بالمقارنة مع المتحكمات الكلاسيكية نوع PID.

8- المراجع العلمية

- 1- [A] Karl S., and Burhanettin Koc, (2016). **Piezoelectric Motors, an Overview.**
- 2- [B] Wenyu L., Sunan H., Silu C, (2013). **Precision Motion Control of a Linear Piezoelectric Ultrasonic Motor Stage, Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE/ASME International Conference.**
- 3- [C] Filip S, (2013). **Dynamic Modeling and Bioinspired Control of a Walking Piezoelectric Motor**, Bielefeld University, PUB-ID: 2656366.
- 4- [D] Chun-Fei H., Chih-Min L., Tsu-Tian L., (2005). Adaptive Fuzzy Sliding-mode Control for Linear Piezoelectric Ceramic Motor, The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ '05.
- 5- [E] Faa-Jeng L., Rong-Jong W., Kuo-Kai S, (2001). Recurrent fuzzy neural network control for piezoelectric ceramic linear ultrasonic motor drive, **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** . Vol.48, **Issue: 4**, pp: 900 – 913.
- 6- [F] Chih-Min L., Hsin-Yi L. (2014). **Intelligent Control Using the Wavelet Fuzzy CMAC Backstepping Control System for Two-Axis Linear Piezoelectric Ceramic Motor Drive Systems**, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems (TFS)* is published bimonthly. 22, **Issue: 4**, pp: 791 – 802.
- [G] David N., Ephrahim G. and Garnett C H., (2017). A linear piezoelectric motor, **Smart Materials and Structures**